

Ekstraksi Informasi Dari DEM SRTM Untuk Pemetaan Struktur Geologi Studi Kasus: Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta

Bayu Raharja^{1}, Agung Setianto², Anastasia Dewi Titisari²*

*1. Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian Energi dan Sumber Daya
Mineral, Jakarta pusat*

*2. Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Yogyakarta*

**bayu.raharja@esdm.go.id*

SARI

Data digital elevation model (DEM) dapat digunakan untuk interpretasi struktur geologi, khususnya sesar. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji seberapa jauh ekstraksi informasi dari DEM SRTM untuk pemetaan struktur geologi dapat dilakukan. *Shaded relief*, kelurusan, kemiringan dan arah hadap lereng, pola aliran dan *curvature* digunakan sebagai input dalam interpretasi struktur geologi menggunakan pendekatan morfologi melalui proses, material dan struktur. Variasi penggunaan sudut elevasi dan arah cahaya matahari serta besarnya *vertical exaggeration* sangat berpengaruh pada hasil *shaded relief*. Kelurusan dapat diekstrak secara otomatis dari citra *shaded relief*. Hasil penelitian menunjukkan tumpang susun informasi dari *shaded relief*, kelurusan, kemiringan lereng, arah hadap lereng, pola aliran dan *curvature* menjadi alat yang ampuh dan memudahkan proses interpretasi struktur geologi. Analisis data DEM secara umum hanya dapat menentukan indikasi lokasi keterdapatan sesar, sedangkan jenis dan arah sesar tidak dapat diinterpretasi dari DEM.

Kata kunci: DEM; SRTM; struktur geologi; interpretasi.

ABSTRACT

Digital elevation model (DEM) data can be used as an input for interpreting geological structures, especially faults. This study aims to determine of extracting geological information from SRTM DEM for geological structure interpretation. Information such as shaded relief, lineament, slope, aspect, drainage network and curvature were used as input for the interpretation using the morphological approach which includes processes, materials, and structures. The vertical exaggeration and sun azimuth and altitude for relief illumination can be varied to obtain different images with different enhanced features. Lineaments can be automatically extracted from the shaded relief. The results showed that the combination of shaded relief, lineament, slope, aspect, drainage network and curvature can be a powerful tool for geological structure interpretation.

How to Cite: Raharja, B., Setianto, A., Titisari, A.D., 2020. Ekstraksi Informasi Dari DEM SRTM Untuk Pemetaan Struktur Geologi Studi Kasus: Kokap, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Geomine*, 8(2): 80-95.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Article History:

Submitte 17 Januari 2020

Received in from 29 Januari 2020

Accepted 21 Agustus 2020

Lisensec By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



In general, DEM data analysis can only determine indications of fault location, whereas the types and directions of faults cannot be interpreted.

Keyword: DEM; SRTM; geological structure; interpretation.

PENDAHULUAN

Informasi geologi dari suatu area dapat diekstrak dari data penginderaan jauh dengan menganalisis elemen dasar dari citra tersebut seperti rona atau warna, tekstur, pola, ukuran, bentuk, bayangan, dan asosiasi. Elemen-elemen tersebut akan menggambarkan ekspresi permukaan suatu daerah mencakup morfologi, kelembapan tanah, tutupan lahan, dan pola aliran yang sangat dipengaruhi oleh tipe litologi, struktur geologi, proses, dan waktu. Data *digital elevation model* (DEM) merupakan produk penginderaan jauh yang banyak dimanfaatkan untuk pemetaan struktur geologi. Informasi geologi dapat diekstrak dari data DEM meliputi *shaded relief*, kelurusan, kemiringan dan arah hadap lereng, pola aliran dan *curvature* yang dapat digunakan untuk mengekstrak informasi tentang jenis litologi dan struktur geologi bahkan lebih jauh lagi data DEM dapat digunakan untuk analisis morfotektonik (Evans, 1980; Jordan, 2005; Abdullah, dkk., 2010; Muhammad dan Awdal, 2012). Alaska Satellite Facility (ASF) melakukan *up sampling* produk citra Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) menggunakan metode *resampling* sederhana sehingga meningkatkan resolusi spasial DEM STRM menjadi 12,5 meter. DEM SRTM *resampling* ini biasanya digunakan untuk proses produk *radiometrically terrain corrected* (RTC) citra Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS - PALSAR) pada resolusi tinggi dan menengah (Laurencelle, dkk., 2015).

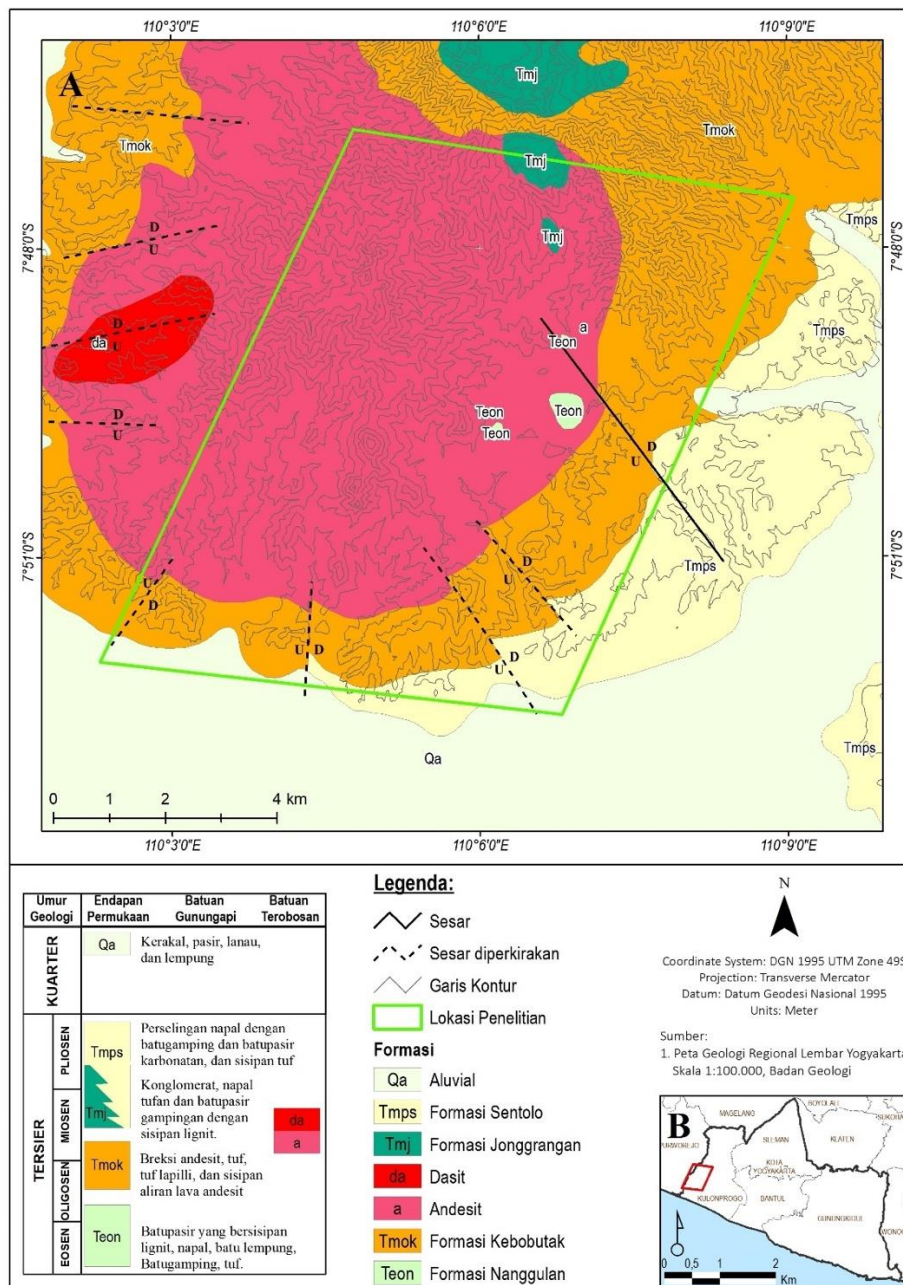
Banyak peneliti telah sukses menggunakan data DEM untuk pemetaan struktur geologi. Nugroho dan Santoso (2015) melakukan ekstraksi kelurusan secara otomatis dari data STRM di seluruh wilayah Pulau Bangka. Sulthoni (2017) menggunakan DEM STRM untuk memetakan kelurusan-kelurusan yang mengontrol terjadinya mineralisasi di daerah Gunung Ijo. Firdaus dan Setianto (2018) menggabungkan data citra optis Landsat 8 dengan data SRTM dan Gravitasi untuk menginterpretasikan struktur geologi yang berasosiasi dengan zona deformasi tektonik di Cekungan Jawa Timur Utara. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sejauh mana informasi tentang struktur geologi dapat dipetakan dengan memanfaatkan data DEM SRTM *resampling* tersebut. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan manfaat pada studi struktur geologi dan tektonik di daerah lainnya.

GEOLOGI UMUM

Pegunungan Kulon Progo menyerupai kubah besar (Oblong Dome), berarah baratdaya – timurlaut sepanjang 32 km dengan lebar 20 km yang terbentuk akibat peristiwa tektonik *uplift*. Kubah ini tersusun atas material gunungapi andesit tua berumur Oligosen – Miosen, yaitu Gunung Gajah, Gunung Ijo, dan Gunung Menoreh (van Bemmelen, 1949). Menurut Suroso, dkk. (1986) Gunung Gajah yang berada di bagian tengah *dome* tersebut terbentuk pertama kali dan menghasilkan andesit augit basaltik. Selanjutnya, pada bagian selatan terbentuk Gunung Ijo yang menghasilkan andesit piroksen basaltik, kemudian andesit augit hornblenda, serta intrusi dasit pada tahap akhir (Suroso, dkk., 1986). Terakhir, Gunung Menoreh terbentuk dibagian utara setelah aktivitas Gunung Gajah berhenti dan mengalami denudasi (van Bemmelen, 1949), menghasilkan andesit augit hornblenda, intrusi dasit dan terakhir intrusi andesit (Suroso, dkk., 1986).

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Yogyakarta 1408-2 dan 1407-5 (Gambar 1A), lokasi penelitian sebagian besar terletak kompleks batuan intrusi berumur Oligosen

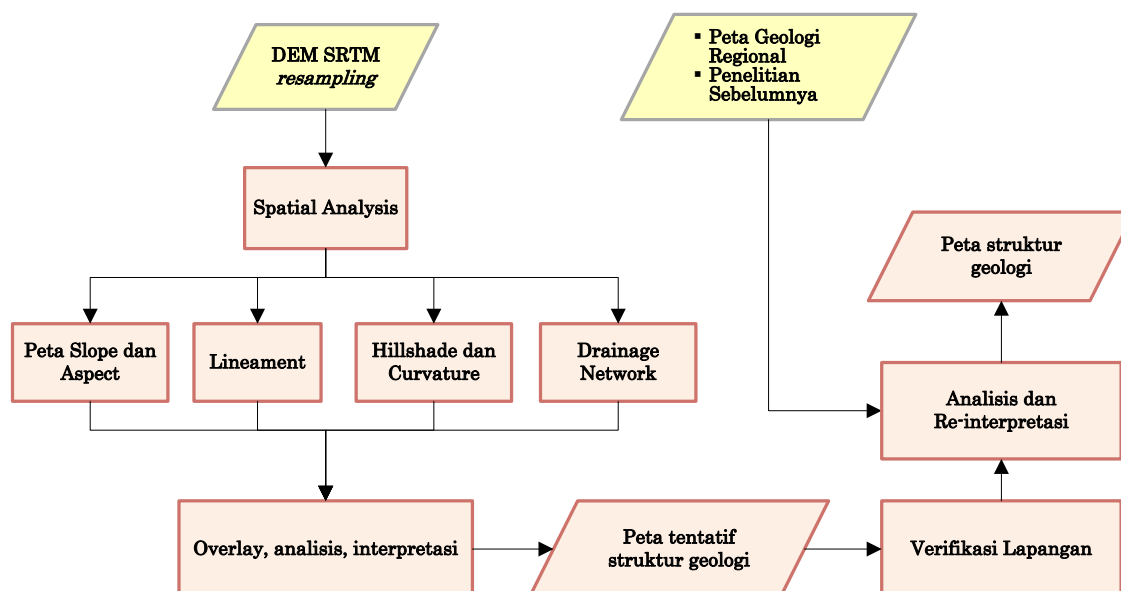
hingga Miosen, berupa intrusi andesit (a). Intrusi ini yang menerobos Formasi Nanggulan (Teon) dan Formasi Kebobutak (Tmok). Selain itu, terdapat struktur-struktur geologi yang merupakan hasil gabungan dari vulkanisme dan proses sekunder (Widagdo et al., 2016). Menurut Rahardjo, dkk. (1995) sesar-sesar yang berkembang di Pegunungan Kulon Progo bersifat pasti dan diperkirakan (Gambar 1A). Bronto (2006) menyatakan sesar-sesar tersebut umumnya merupakan sesar normal dan sesar naik. Sesar turun bersifat pasti salah satunya terdapat di bagian timur yaitu pada lokasi Waduk Sermo yang memotong intrusi andesit, Formasi Kebobutak, dan Formasi Sentolo. Sesar naik diperkirakan ditemukan pada Gunung Menoreh yang membatasi intrusi andesit (*hanging wall*) dengan Formasi Kebobutak dan Formasi Jonggrangan (*footwall*). Selain itu sesar turun bersifat diperkirakan ditemukan menyebar membentuk pola radial di sekitar tubuh satuan intrusi andesit yaitu pada lokasi Gunung Ijo.



Gambar 1. Peta Geologi Regional Lembar Yogyakarta (A) dan Lokasi Penelitian (B)

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada daerah Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (**Error! Reference source not found.**B). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah DEM SRTM *resampling* hasil akuisisi tanggal 3 Oktober 2010 dengan resolusi spasial 12,5 meter yang diunduh secara gratis pada website <https://search.asf.alaska.edu>. Ekstraksi informasi dari data DEM untuk mendapatkan informasi struktur geologi meliputi shaded relief, kelurusan, kemiringan lereng, arah hadap lereng, pola aliran dan *curvature*. Keenam aspek ini menjadi input dalam analisis *overlay* untuk interpretasi struktur geologi (Gambar 2). Pendekatan interpretasi yang dilakukan adalah dengan pendekatan morfologi melalui proses, material, dan struktur. Metode ini dikemukakan oleh Strandberg (1967), Lillesand dan Kiefer (1979), dan Drury (1987) yang menjabarkan dan membahas tentang teknik interpretasi geologi dari suatu citra penginderaan jauh. Secara lengkap, tahapan penelitian disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Tahapan Kegiatan

Tahapan penelitian	Metode dan Langkah Kerja	Hasil yang diharapkan
Pengumpulan data	Download melalui situs <i>Alaska Satellite Facility</i> (ASF)	Data DEM SRTM <i>resampling</i>
Analisis DEM	Pembuatan peta kemiringan lereng dilakukan dengan modul <i>spatial analysis</i> pada perangkat lunak ArcGIS. Kemiringan lereng dalam satuan derajat.	Peta kemiringan lereng
	Pembuatan peta arah hadap lereng dilakukan dengan modul <i>spatial analysis</i> pada perangkat lunak ArcGIS.	Peta arah hadap lereng

Tahapan penelitian	Metode dan Langkah Kerja	Hasil yang diharapkan
	Pembuatan <i>shaded relief</i> dilakukan dengan modul <i>spatial analysis</i> pada ArcGIS. <i>Shaded relief</i> dibuat dari 4 arah azimuth berbeda (315°, 0°, 45°, dan 90°) kemudian digabung dengan <i>raster calculator tool</i> menjadi 1 peta <i>shaded relief</i>	Peta <i>shaded relief</i>
	Pembuatan kelurusan dilakukan secara manual (digitasi) dan otomatis (perangkat lunak PCI Geomatica modul LINE). Kelurusan diekstrak dari 4 peta azimuth <i>shaded relief</i> . Arah tegasan utama dianalisa dengan diagram mawar yang dibuat dengan perangkat lunak RockWorks dan Dips.	Peta kelurusan dan diagram mawar
	Pembuatan <i>curvature</i> dilakukan dengan modul <i>spatial analysis</i> pada perangkat lunak ArcGIS	Peta <i>curvature</i>
	Pembuatan jaringan sungai (<i>drainage network</i>) dilakukan dengan modul <i>spatial analysis</i> pada perangkat lunak ArcGIS	Peta jaringan sungai
Interpretasi struktur geologi	Proses overlay, interpretasi, dan analisis dilakukan dari hasil pengolahan data DEM (kelurusan, kemiringan lereng, arah hadap lereng, jaringan sungai dan <i>curvature</i>). Penggunaan data sekunder citra RGB <i>false color composite</i> dilakukan untuk memudahkan identifikasi dan interpretasi.	Peta tentatif struktur geologi
Verifikasi hasil interpretasi	Verifikasi dilakukan menggunakan data primer hasil survei lapangan dan data sekunder dari penelitian terdahulu. Peta geologi regional dan penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dalam menentukan jenis sesar.	Peta struktur geologi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Shaded relief dan kelurusan

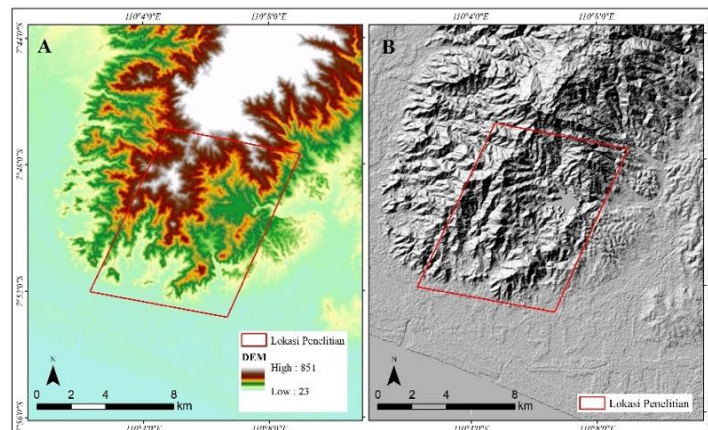
Shaded relief bertujuan untuk meningkatkan kontras variasi intensitas pada gambar yang halus, lebih dari representasi *contouring* atau *pseudo-color* (Drury, 1987) sehingga interpretasi morfologi dan litologi bisa dilakukan lebih maksimal. Arah pencahayaan yang digunakan dalam pembuatan *shaded relief* ada empat azimuth, yaitu 315°, 0°, 45°, dan 90°. Sudut elevasi (*altitude*) matahari yang digunakan ada dua, yaitu 45° dan 75° dan hanya akan dipilih satu yang terbaik. Keempat hasil *shaded relief* dengan sudut matahari terpilih kemudian dirata-rata secara *weighted sum* dengan *raster calculator tool* menjadi 1 peta *shaded relief*. Penggunaan *vertical exaggeration* (VE) dan filter pada visualisasi *shaded relief* juga banyak membantu analisis. Penelitian ini membandingkan dua skala VE yaitu perbesaran 3 kali dan 5 kali.

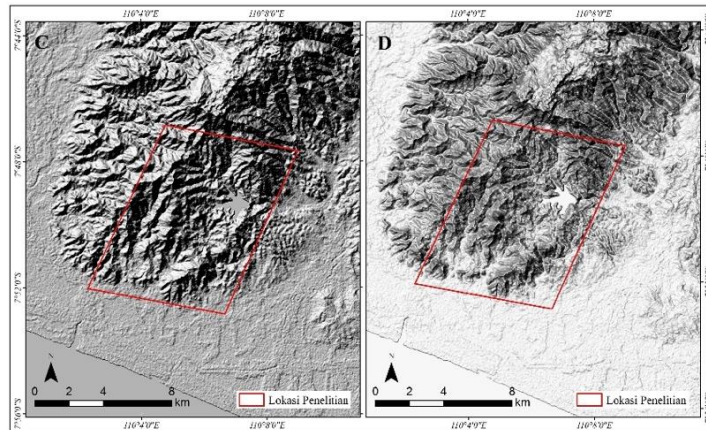
Variasi dari arah pencahayaan, sudut elevasi matahari dan VE sangat mengontrol hasil *shaded relief*. VE berhasil memperjelas perbedaan morfologi di daerah penelitian. Dari perbandingan Gambar 3B dan Gambar 3C menunjukkan semakin besar nilai VE, kontras morfologi semakin tampak. Hasil pemrosesan *shaded relief* menunjukkan bahwa penggunaan sudut elevasi matahari (*sun altitude*) 75° lebih menonjolkan aspek morfologi dibandingkan penggunaan sudut elevasi matahari 45°. Berdasarkan hasil perbandingan *shaded relief* (Gambar 3C dan Gambar 3D), penelitian ini menggunakan sudut elevasi matahari 75° dengan perbesaran VE 5 kali. Selanjutnya, pembuatan *shaded relief* dilakukan menggunakan 4 variasi arah pencahayaan matahari yaitu 315°, 0°, 45°, dan 90° dengan sudut elevasi matahari 75°, serta perbesaran VE 5 kali. Hasilnya berupa 4 peta *shaded relief* yang kemudian dijumlahkan dengan *weighted sum* dengan bobot sama sebesar 0,25 untuk tiap arah pencahayaan *shaded relief*. Hasilnya berupa satu peta *shaded relief weighted sum*.

Setelah mendapatkan *shaded relief* dari berbagai arah azimuth matahari (315° , 0° , 45° , 90° , dan *weighted sum*), dilakukan ekstraksi kelurusan secara otomatis menggunakan bantuan perangkat lunak PCI Geomatica dengan modul LINE. Parameter input yang digunakan mengacu pada Tabel 2 (Nugroho dan Santoso, 2015). Proses ini menghasilkan lima peta kelurusan dari lima arah azimuth berbeda (Gambar 4). Perlu diperhatikan bahwa hasil kelurusan yang dihasilkan secara otomatis dari data DEM mengandung kelurusan struktur. Kelurusan struktur merupakan kelurusan yang dikontrol oleh struktur geologi yang menghasilkan kelurusan topografi seperti punggung bukit dan lembah, depresi atau *escarpment* dan sebagian besar kelurusan tersebut merupakan manifestasi dari arah kekar, sesar, lipatan, dike dan kontak lapisan batuan (Pluijm dan Marshak, 2004). Menurut Muhammad dan Awdal, (2012), kelurusan merupakan salah satu *feature* yang menunjukkan unsur bawah permukaan atau struktur yang lemah seperti patahan. Kelurusan yang merupakan struktur geologi berasosiasi dengan kelurusan lembah yang merupakan zona lemah yang biasanya merupakan kelurusan tektonik (Firdaus dan Setianto, 2018).

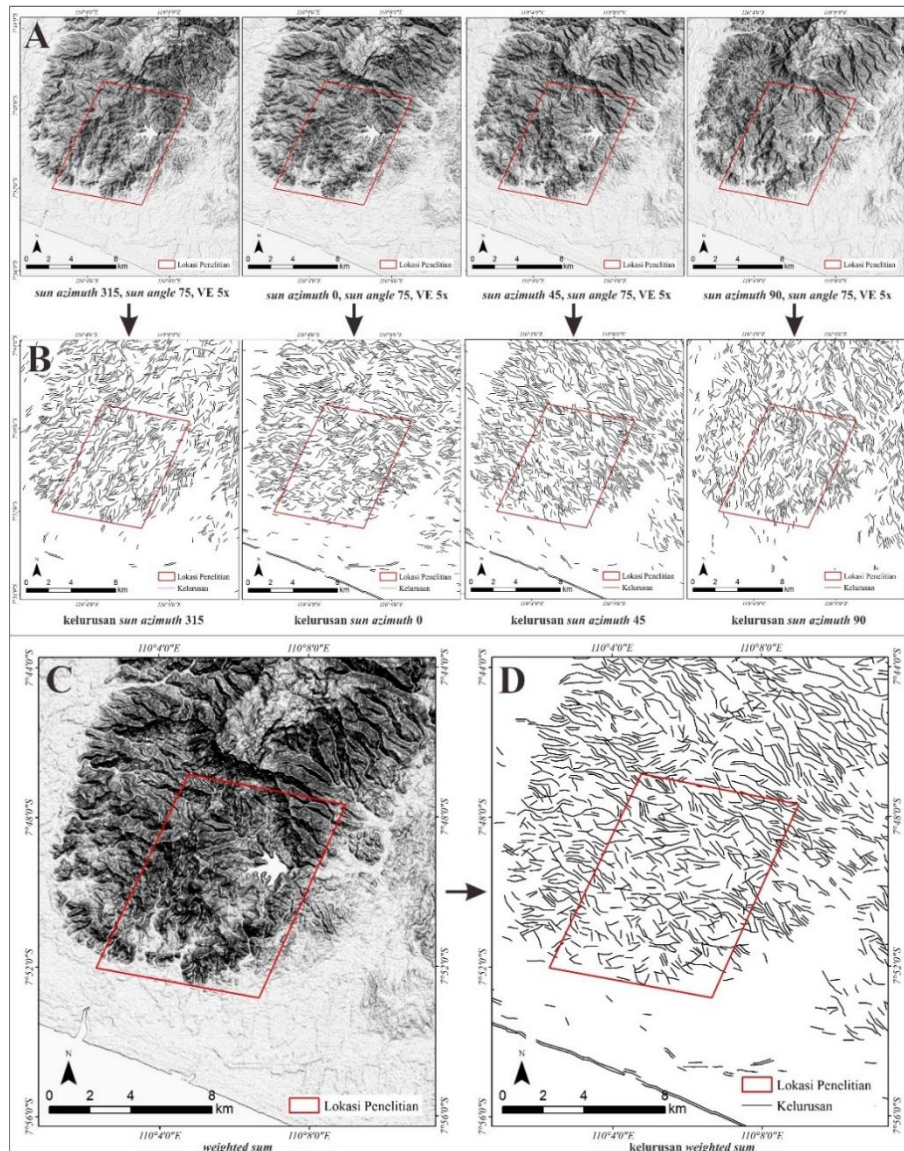
Tabel 2. Nilai input parameter algoritma modul LINE

Parameter	Nilai	Keterangan
RADI	12	Nilai radius dari piksel yang akan dikenai filter penajaman tepi
GTHR	90	Nilai ambang gradien tepi
LTHR	30	Nilai panjang minimum piksel yang akan dihubungkan menjadi vector kelurusan
FTHR	10	Nilai ambang toleransi kesalahan
ATHR	30	Nilai maksimum perbedaan sudut antar dua vector yang dihubungkan
DTHR	20	Nilai Panjang maksimum antar dua vector (dalam piksel) yang akan dihubungkan





Gambar 3. Data DEM SRTM *resampling* (A), *shaded relief* pada *sun azimuth* 315° dengan *sun altitude* 45° dan VE 3 kali (B), *shaded relief* pada *sun azimuth* 315° dengan *sun altitude* 45° dan VE 5 kali (C) dan *shaded relief* pada *sun azimuth* 315° dengan *sun altitude* 75° dan VE 5 kali (D)



Gambar 4. Hasil *shaded relief* pada *sun azimuth* 315°, 0°, 45°, dan 90° (A), hasil ekstraksi kelurusan dari tiap *shaded relief* (B), peta *shaded relief weighted sum* (C), dan ekstraksi kelurusan dari *shaded relief weighted sum* (D)

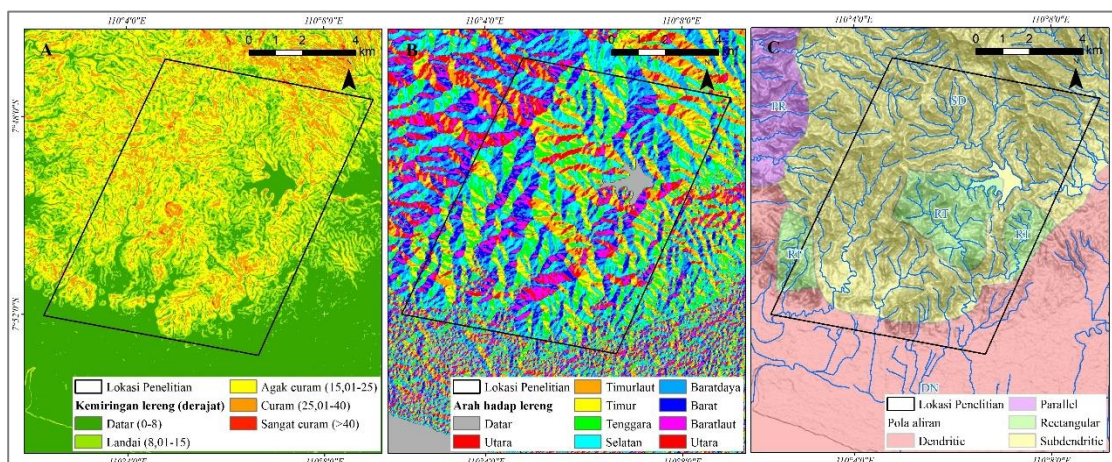
Kemiringan dan arah hadap lereng

Informasi lain yang diekstrak dari data DEM adalah peta kemiringan lereng dan arah hadap lereng. Kemiringan dan arah hadap lereng akan sangat membantu dalam interpretasi struktur geologi. Perubahan nilai yang signifikan pada kemiringan lereng dan arah hadap lereng dapat diindikasikan sebagai kehadiran struktur linear. Kemiringan lereng dikalkulasi dalam satuan derajat (°) yang kemudian dikelompokkan menjadi lima kelas yaitu: datar (0°-8°), landai (8,01°-15°), agak curam (15,01°-25°), curam (25,01°-40°) dan sangat curam (>40°). Lokasi penelitian terlihat didominasi oleh kemiringan lereng agak curam (Gambar 5A).

Untuk arah hadap lereng *by default* akan terpetakan pada delapan arah mata angin (utara, timurlaut, timur, tenggara, selatan, baratdaya, barat, dan baratlaut) serta satu kelas sebagai datar (Gambar 5B). Arah hadap lereng akan menggambarkan dengan baik pola bentukan topografi akibat struktur sehingga sangat membantu dalam analisis. Kelurusan lembah dan punggung nantinya akan nampak dengan jelas pada peta arah hadap lereng. Keduanya akan berasosiasi dengan pergantian atau pertemuan dari 2 (dua) arah hadap lereng yang berbeda.

Pola aliran

Pola aliran sungai di daerah penelitian terbagi kedalam tiga tipe yaitu pola *rectangular*, *dendritic*, dan *subdendritic* (Gambar 5C). Pola *rectangular* dikontrol oleh struktur dan membentuk sungai beserta percabangannya memiliki pembelokan yang tajam yang dikontrol oleh adanya kekar dan sesar. Pola aliran *dendritic* dan *subdendritic* membentuk sungai bermuara ke sungai utama dengan pola yang dikendalikan yang oleh litologi yang relatif homogen. Pola aliran merupakan petunjuk penting untuk mengetahui jenis batuan dan kontrol struktur pada suatu daerah. Rajesh (2004) menyatakan bahwa pola aliran pada batuan beku lebih rapat dibandingkan pola aliran pada batuan sedimen karena infiltrasi yang lebih rendah. Selain itu, bentuk morfologi batuan beku juga relatif dominan lebih tinggi dibandingkan batuan sedimen karena batuan beku lebih resisten terhadap pelapukan dan erosi.

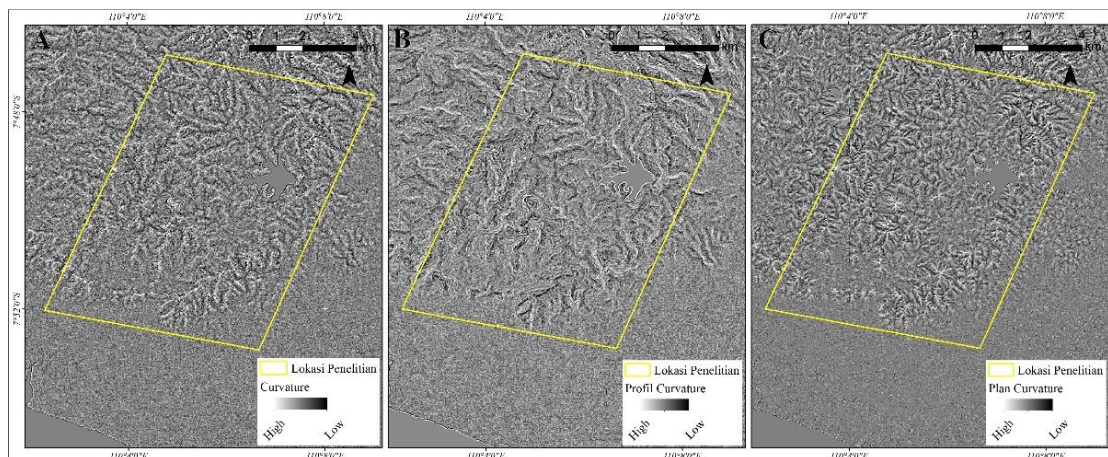


Gambar 5. Peta kemiringan lereng (A), arah hadap lereng (B) dan pola aliran (C)

Curvature

Curvature didefinisikan sebagai turunan kedua dari suatu permukaan, atau *slope of slope*. *Curvature* sangat bermanfaat dalam mengidentifikasi suatu area yang memiliki perubahan dan variasi kemiringan lereng serta arah hadap lereng yang signifikan tinggi. Dalam ArcGIS *Spatial Analyst*, *curvature tool* selain menghasilkan *curvature* itu sendiri, akan menghasilkan dua data lain yang juga bermanfaat yaitu *profile curvature* dan *planform curvature* (Gambar 6). *Profile curvature* selalu parallel dengan arah dari kemiringan maksimal lereng. *Planform curvature* atau yang biasa disebut *plan curvature* adalah arah tegak lurus dari kemiringan maksimal lereng.

Tumpang susun antara *curvature*, *profile curvature*, dan *plan curvature* dengan *shaded relief* dan DEM dapat lebih menonjolkan aspek morfologi. Hal ini akan memudahkan dalam interpretasi dan deliniasi kelurusan struktur linear. Kelurusan lembah yang mengindikasikan keberadaan struktur geologi (Firdaus dan Setianto, 2018) akan berasosiasi dengan nilai digital rendah pada peta *curvature*. Artinya struktur geologi akan berada pada piksel gelap pada peta *curvature*. Sebaliknya pada *profile curvature*, struktur geologi akan berasosiasi dengan nilai piksel tinggi atau pada rona terang dari *profile curvature*. Pada peta *plan curvature*, struktur geologi akan berasosiasi dengan nilai rendah, sehingga akan berada pada rona gelap.



Gambar 6. Peta *curvature* (A), *profile curvature* (B), dan *plan curvature* (C)

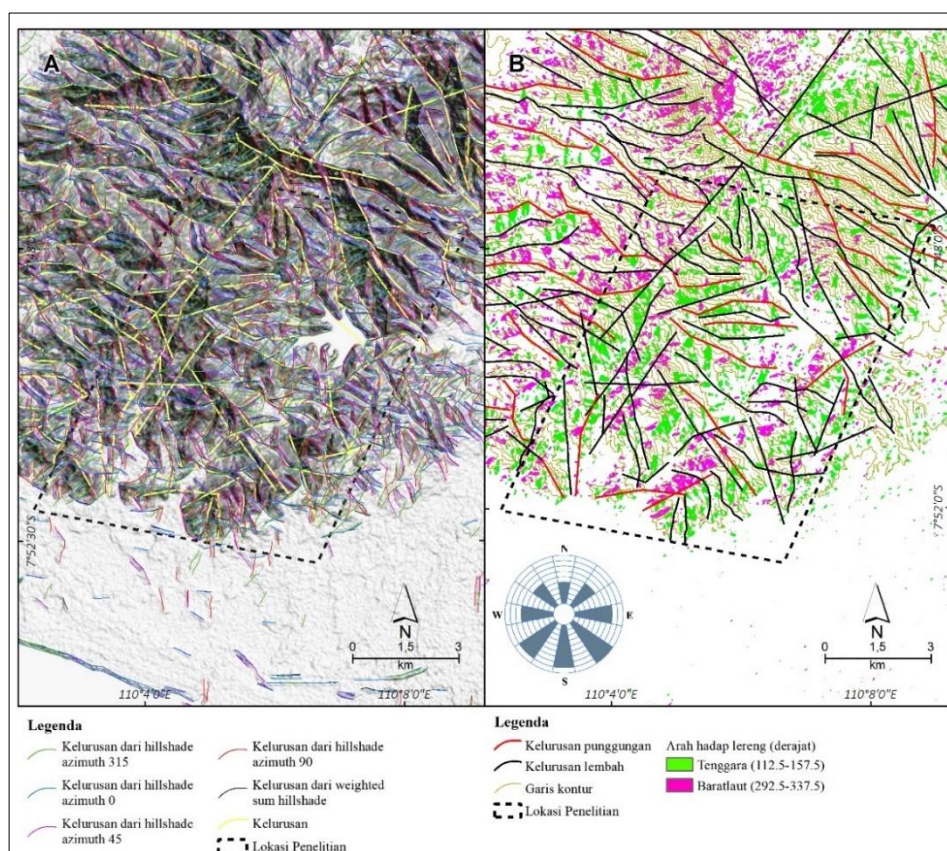
Interpretasi struktur geologi

Struktur geologi yang dapat dipetakan dari data penginderaan jauh pada penelitian ini hanya berupa sesar meskipun kekar juga banyak berkembang di lokasi penelitian. Proses interpretasi struktur geologi diawali dengan menggabungkan hasil ekstraksi kelurusan dari lima *sun azimuth* yang telah diperoleh pada tahapan sebelumnya. *Shaded relief* digunakan sebagai dasar dalam menggabungkan kelurusan ini. Interpretasi dilakukan secara manual pada perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Kelurusan-kelurusan dipisahkan dengan mengambil kelurusan yang merupakan kelurusan punggung dan lembah saja, dengan asumsi kelurusan inilah yang kemungkinan besar berasosiasi dengan struktur geologi. Tumpang tindih kelurusan dengan peta *shaded relief*, arah hadap lereng serta jaringan sungai memudahkan proses interpretasi. Pada beberapa lokasi, ditemukan kelurusan punggung dan lembah muncul berasosiasi dengan beberapa kelurusan dari *sun azimuth* yang berbeda. Kelurusan punggung berasosiasi dengan punggung bukit yang terlihat sebagai puncak *shaded relief* sedangkan kelurusan lembah berasosiasi dengan lembah dari bukit pada peta *shaded relief* yang umumnya merupakan sungai. Hasil dari proses ini adalah peta kelurusan yang didalamnya memuat informasi tentang kelurusan punggung dan kelurusan lembah (Gambar 7A).

Untuk memverifikasi hasil interpretasi kelurusan dilakukan tumpang susun kelurusan dengan peta arah hadap lereng hasil ekstraksi DEM. Pada lokasi penelitian arah hadap lereng

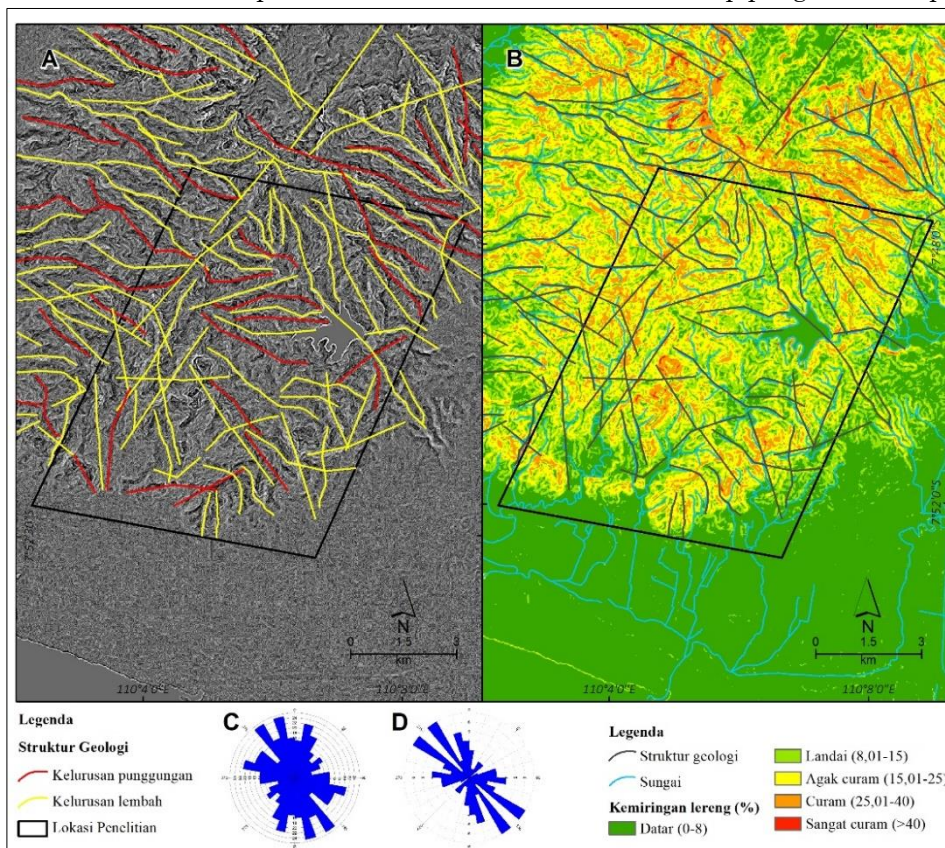
berdasarkan diagram mawar didominasi oleh lereng pada azimuth $112.5^{\circ} - 157.5^{\circ}$ yang menghadap tenggara. Oleh sebab itu, tumpang susun kelurusan dilakukan hanya pada arah hadap azimuth $112.5^{\circ} - 157.5^{\circ}$ (tenggara) dan $292.5^{\circ} - 337.5^{\circ}$ (baratlaut) yang merupakan kebalikan azimuth tenggara. Arah hadap lereng yang dimunculkan hanya arah hadap lereng pada kemiringan lereng di atas 8° (kelas slope $\geq$ agak curam). Tujuannya untuk menyederhanakan informasi arah hadap lereng yang tampil pada peta, sehingga analisis dapat dilakukan dengan lebih mudah (Gambar 7B). Hasil overlay menunjukkan bahwa seluruh kelurusan berasosiasi dengan arah hadap lereng pada azimuth $112.5^{\circ} - 157.5^{\circ}$ (tenggara) dan $292.5^{\circ} - 337.5^{\circ}$ (baratlaut).

Verifikasi hasil deliniasi kelurusan dilakukan juga menggunakan peta *curvature*. Pada peta *curvature* kelurusan punggung dan kelurusan lembah akan ditampilkan dengan rona kontras antara gelap dan terang (Jordan, et al., 2005). Kelurusan lembah yang mengindikasikan adanya struktur geologi digambarkan dengan rona terang pada peta *profile curvature* (Gambar 8A). Piksel terang ini berasosiasi dengan sungai yang merupakan zona lemah dimana batuan terkikis dan mengindikasikan adanya struktur geologi. Kelurusan punggung dieliminasi pada tahap ini sehingga hanya menyisakan kelurusan lembah (Gambar 8B). Diagram mawar yang menggambarkan frekuensi distribusi arah sungai dibuat untuk melihat pola arah yang dominan (Gambar 8C). Diagram mawar ini hanya mengkalkulasi arah sungai dengan panjang sungai >500 meter. Sungai dengan panjang kurang dari 500 meter tidak dimasukkan dalam perhitungan *rose diagram*. Tampak bahwa aliran sungai mayoritas memiliki arah NW-SE konsisten dengan arah kelurusan yang mayoritas menunjukkan pola NW-SE (Gambar 8D).

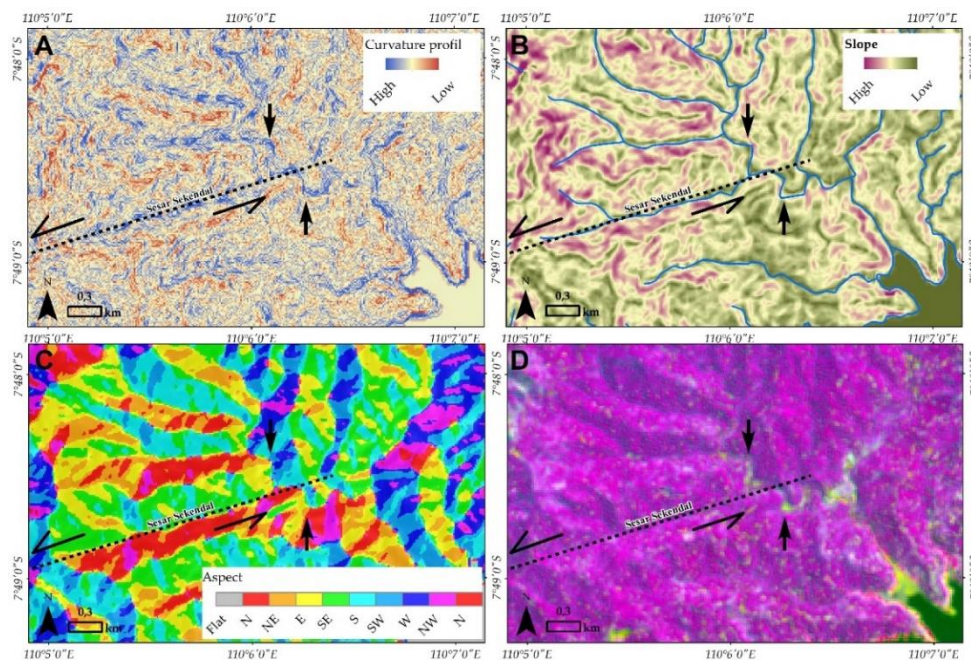


Gambar 7. Interpretasi kelurusan berdasarkan shaded relief (A) dan tumpang susun kelurusan punggung dan kelurusan lembah pada peta arah hadap lereng (B). *Rose diagram* menggambarkan frekuensi *aspect* pada *slope* $\geq 8^{\circ}$

Interpretasi data penginderaan jauh secara umum hanya dapat menentukan indikasi lokasi keterdapatan sesar, sedangkan jenis dan arah sesar tidak dapat diinterpretasi kecuali pada sesar mendatar yang memiliki ciri kenampakan pada citra. Gambar 9A merupakan indikasi pada peta *profil curvature* bahwa Sesar Sekendal memiliki pergerakan mendatar kiri (sinistral) yang dapat diamati dari nilai *profil curvature* tinggi (warna biru) yang bergeser. Kenampakan ini juga terlihat pada peta kemiringan lereng (Gambar 9B) dan peta arah hadap lereng (Gambar 9C) yang mengindikasikan adanya *offset* pada alur sungai yang dipotong oleh Sesar Sekendal. Citra Sentinel-2 kombinasi warna semu saluran 6-5-7 juga memperlihatkan *offset* pada alur sungai yang menguatkan hasil interpretasi (Gambar 9D). Selain Sesar Sekendal, pendekatan interpretasi dengan metode ini berhasil mengidentifikasi Sesar Nagung, Sesar Gunung Jeruk dan Sesar Tlogolelo yang merupakan sesar dekstral (Gambar 10). Keempat sesar ini bersifat diperkirakan karena tidak melalui tahap pengukuran lapangan.



Gambar 8. Tumpang susun profil *curvature* dengan kelurusan punggung dan kelurusan lembah (A), Tumpang susun kelurusan lembah dengan peta kemiringan lereng. Struktur geologi akan berasosiasi dengan pergantian slope yang kontras dan seragam (B), *Rose diagram* dari segmen sungai dengan panjang > 500 meter (C), dan *Rose diagram* struktur geologi pada lokasi penelitian (D)



Gambar 9. Kenampakan sesar mendatar Sekendal pada *profil curvature* (A), *slope* (B), *aspect* (C), dan citra Sentinel-2 saluran 6-5-7 dalam RGB (D)

Penentuan jenis sesar lainnya dilakukan dengan menumpangsusunkan hasil deliniasi kelurusan lembah (Gambar 8B) dengan peta geologi regional dan penelitian sebelumnya (Rahardjo, dkk., 1995, Pramumijoyo, 2017, Sulthoni, 2017, Widagdo, dkk., 2017, Widagdo, dkk., 2019). Sesar yang ditemukan di lokasi penelitian berupa sesar geser sinistral, sesar geser dekstral, sesar naik, dan sesar normal baik yang bersifat pasti maupun diperkirakan (Gambar 10A). Pola sesar yang kompleks dan saling memotong pada lokasi penelitian mengindikasikan bahwa telah terjadi lebih dari satu kali fase tektonik (Widagdo, dkk., 2017).

Pembentukan struktur geologi pada fase tektonik I merupakan hasil kompresi dengan arah tegasan utama (σ_1) N-S yang menghasilkan sesar sinistral dengan orientasi NNE-SSW dan sesar dekstral dengan orientasi NW-SE (Gambar 10B). Hall et al., (2007), Smyth et al., (2008) serta Husein dan Nukman (2015) menyatakan bahwa sesar-sesar sinistral ini telah ada sejak Oligosen Akhir, namun Widagdo, dkk. (2016) menyatakan gugusan sesar-sesar sinistral ini memotong Gunung Menoreh, sehingga berumur sekitar Miosen Akhir. Sesar-sesar sinistral ini kemudian mempengaruhi pembentukan sesar-sesar normal dengan arah orientasi N-S terbentuk tegak lurus terhadap gaya utama terlemah (σ_3).

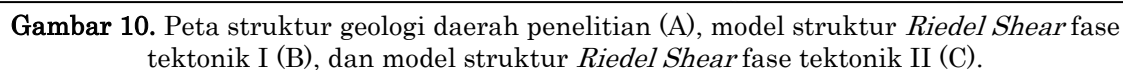
Fase tektonik kedua merupakan gaya kompresi dengan arah tenggara-baratlaut (NW-SE) yang terjadi sekitar masa Pleistosen (Widagdo, dkk., 2019). Arah gaya N-S mengalami reorientasi di jalur sesar Opak yang berada di sebelah timur daerah penelitian (Gambar 10D) dan mendorong batuan dasar Cekungan Yogyakarta ke arah baratlaut (NW) sebagai gaya utama (σ_1). Widagdo, dkk. (2019) mengemukakan, gerakan ini menghasilkan struktur sesar sinistral dan dekstral di timur Gunung Gajah. Pada daerah penelitian fase ini melahirkan rangkaian sesar normal dengan arah NW-SE (baik bersifat pasti maupun diperkirakan) dan sesar naik dengan arah NE-SW di bagian timurlaut daerah penelitian (Gambar 10C).

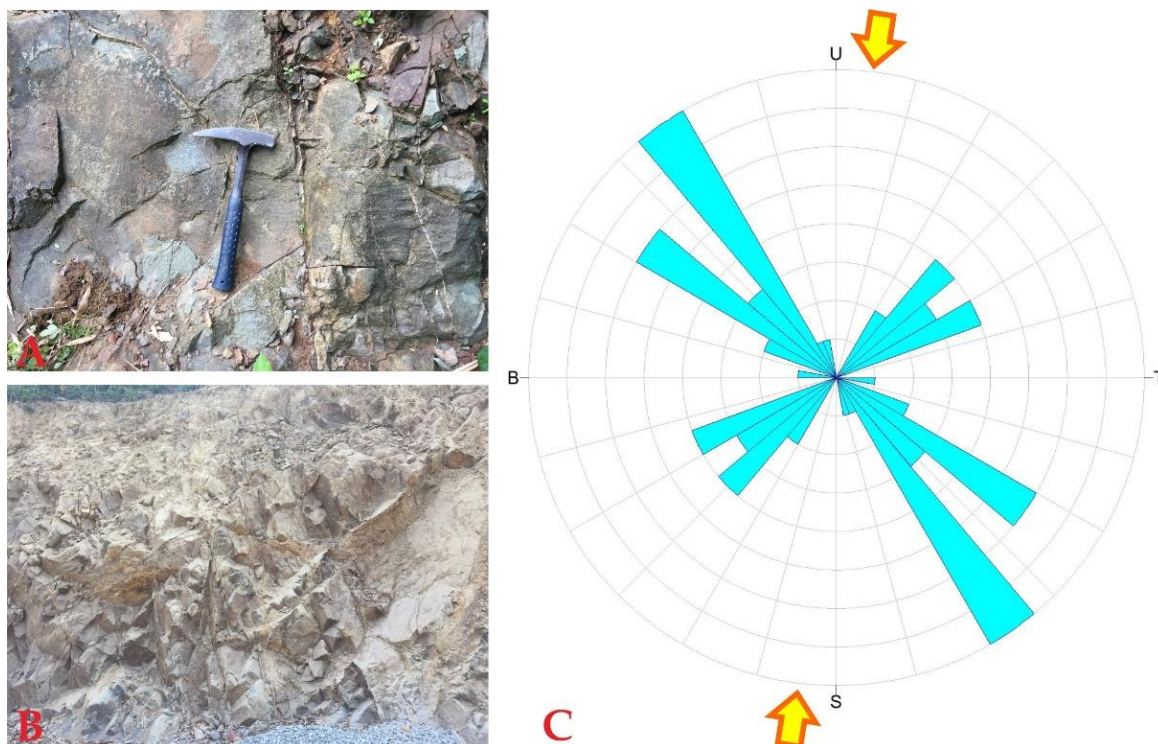
KONDISI LAPANGAN

Struktur geologi yang muncul pada lokasi penelitian berupa sesar dan kekar. Lokasi sesar dapat diinterpretasi dan diperkirakan dari data DEM sedangkan lokasi kekar sulit ditentukan dari DEM. Hal ini karena faktor resolusi spasial data DEM yang kecil sehingga

kekar umumnya tidak terdeteksi dari citra DEM. Kekar lebih mudah ditemukan dengan pengamatan di lapangan secara langsung. Kekar yang ditemukan dilapangan umumnya berupa kekar gerus dan kekar tarik yang banyak berkembang pada litologi intrusi andesit. Kekar-kekar ini berasosiasi dengan sungai yang diasumsikan sebagai zona lemah dimana sesar terjadi. Kekar tarik terbentuk dengan arah tegak lurus dari gaya yang cenderung memindahkan batuan. Gaya ini menarik batuan pada arah berlawanan. Pola kekar tarik tidak teratur dan cenderung membentuk area terbuka (rekahan). Beberapa rekahan pada kekar tarik ditemukan terisi mineral baik kuarsa maupun kalsit yang bersumber dari fluida hidrotermal membentuk vein, salah satunya pada STA010 (**Gambar 11A**).

Kekar gerus terjadi akibat adanya tekanan yang cenderung menggelincirkan bidang satu dengan bidang lain yang berdekatan. Ciri khusus untuk mengenali kekar gerus adalah pola kekar yang berpasangan membentuk sudut lancip dan umumnya rapat, meskipun pada beberapa lokasi ditemukan pola yang tidak rapat. Kekar gerus di lokasi penelitian salah satunya ditemukan pada STA009 (**Gambar 11B**). Hasil pengeplotan pada diagram mawar dari tiga puluh lima (35) kekar gerus menunjukkan bahwa mayoritas kekar ini memiliki orientasi baratlaut-tenggara (NW – SE) dan timurlaut-baratdaya (NE-SW). Arah gaya utama dapat ditentukan dengan melihat arah sudut lancip dari hasil plot diagram mawar (**Gambar 11 C**). Berdasarkan pengukuran didapatkan arah gaya pembentukan kekar adalah utaratimurlaut (NNE)-selatanbaratdaya (SSW). Pola dan arah gaya utama ini relatif sama dengan gaya utama yang membentuk pola aliran sungai dan kelurusan lembah yang diperkirakan sebagai sesar pada diagram mawar Gambar 8C dan Gambar 8D.





Gambar 11. Kenampakan struktur geologi berupa kekar tarik pada STA010 (A) dan kekar gerus pada STA009 (B). Diagram mawar pengukuran kekar gerus pada STA009 ($n = 35$). Arah gaya utama (kompresi) yang bekerja ditunjukkan dengan panah kuning (C).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting dari penelitian ini antara lain:

1. Data DEM dapat digunakan untuk mendapatkan informasi tentang struktur geologi melalui ekstraksi informasi *shaded relief*, *lineament*, *slope*, *aspect*, *drainage network* dan *curvature*.
2. Penggunaan sudut *altitude* matahari 75° dan vertical exaggeration (VE) 5 kali lebih mampu menonjolkan efek morfologi dibandingkan penggunaan sudut *altitude* matahari 45° dengan VE 3 kali.
3. Struktur geologi yang dapat dipetakan dari data penginderaan jauh hanya berupa sesar, meskipun kekar juga banyak berkembang di lokasi penelitian. Hal ini dikarenakan keterbatasan resolusi spasial DEM yang digunakan.
4. Hasil pembuatan diagram mawar dari data kekar, struktur geologi hasil interpretasi serta segmen sungai mengindikasikan arah tegasan utama berorientasi adalah utaratimurlaut (NNE)-selatanbaratdaya (SSW).
5. Analisis data DEM secara umum hanya dapat menentukan indikasi lokasi keterdapatan sesar, sedangkan jenis dan arah sesar tidak dapat diinterpretasi dari DEM.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada kepada Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM serta Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas biaya, waktu, dan fasilitas yang disediakan dalam mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. Akhir, J.M. and Abdullah, I. 2010, *Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15 (J), pp 1–9.
- Bronto, S., 2006. *Fasies Gunung Api dan Aplikasinya*, Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 1, pp. 59 – 71.
- Drury, S.A. 1987. *Image Interpretation in Geology*. Allen and Unwin, London.
- Evans, I.S. 1980. *An integrated system for terrain analysis for slope mapping*. Z. Geomorphol. 36, 274–295.
- Firdaus, S. dan Setianto, A. 2018. *Interpretasi Struktur Geologi Berdasarkan Citra Landsat 8, SRTM dan Anomali Medan Gravitasi Satelit di Cekungan Jawa Timur Utara*. Prosiding Seminar Nasional Geotik. pp 193 - 204
- Hall, R., Clements, B., Smyth, H.R., Cottam, M. A. 2007. *A New Interpretation Of Java's Structure*. Proceedings. Indonesian Petroleum Association, May, 2007.
- Husein, S., dan Nukman, M. 2015. *Rekonstruksi Tektonik Mikrokontinen Pegunungan Selatan Jawa Timur: Sebuah Hipotesis berdasarkan Analisis Kemagnetan Purba*. Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-8, FT-UGM.
- Jordan, G. Meijninger, B.M.L., van Hinsbergen, D.J.J., Meulenkamp, J.E., van Dijk, P.M. 2005. *Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7 (2005), p. 163–182.
- Laurencelle, J., Logan, T., and Gens, R. 2015. *ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS Palsar Product*. Product Guideline. Alaska Satellite Facility (https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf)
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. 1979. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley and Sons. New York, pp. 94-281.
- Muhammad, M.M. dan Awdal, A.H. 2012. *Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEM) in Erbil-Kurdistan, Northeast Iraq*. Advances in Natural and Applied Sciences 6(2), 2012, pp. 138-146.
- Nugroho, U.C. dan Susanto. 2015. Ekstraksi Kelurusan (Lineament) Secara otomatis Menggunakan Data DEM SRTM, Studi Kasus: Pulau Bangka. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XX 2015, pp. 775 – 780.
- Pluijm, B.A.v. dan Marshak, S. 2004. *Earth Structure 2nd*. New York, London: Norton & Company, 673 p, 2004.
- Pramumijoyo, P. 2017. *Geologi, geokimia, dan karakteristik fluida hidrotermal pada endapan epithermal sulfidasi rendah di daerah Sangon, Kokap, DIY*. Tesis. Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta (Tidak dipublikasikan).
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H.M.D. 1995. *Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Rajesh, H.M., 2004, *Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping – An overview*. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, Volume 99, page 83-103.
- Smyth, H.R., Hall R., and Nichols, G.J., (2008). *Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: The stratigraphic record of eruptions on an active continental margin*, Geological Society of America Special Paper 436, p. 199–222.
- Strandberg, C.H. 1967. *Aerial discovery manual*. John Wiley and Sons. New York, pp.75-157.
- Sulthoni, J.N. 2017. *Geologi dan kontrol struktur terhadap mineralisasi epithermal berdasarkan analisis tensor dan geokimia di Gunung Ijo dan sekitarnya, Pegunungan Kulonprogo, DIY*. Skripsi. Teknik Geologi, Universitas Jenderal Soedirman. Purwokerto (Tidak dipublikasikan).

- Suroso, Rodhi, A., & Sutanto, 1986, *Usulan Penyesuaian Tata Nama Litostratigrafi Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta*, Proceeding of The 15th Annual Convention of The Indonesian Association of Geologists, Vol. 1, 10p.
- van Bemmelen, R.W., 1949, *The Geology of Indonesia*, The Hagu, Belanda.
- Widagdo, A., Pramumijoyo, S., Harijoko, A., Setiawan, A. 2016. *Kajian Pendahuluan Kontrol Struktur Geologi Terhadap Sebaran Batuan-Batuan di Daerah Pegunungan Kulonprogo-Yogyakarta*. Proceeding. Seminar Nasional Kebumian ke-9, 6-7 Oktober. Yogyakarta, pp. 9-20.
- Widagdo, A., Pramumijoyo, S., Harijoko, A. 2017. *Rekonstruksi Struktur Geologi Daerah Gunung Ijo di Pegunungan Kulon Progo Yoyakarta Berdasarkan Sebaran Kekar, Sesar, dan Urat Kuarsa*. Proceeding. Seminar Nasional Kebumian ke-10, 13-14 September, Yogyakarta, pp. 1072-1090.
- Widagdo, A., Pramumijoyo, S., Harijoko, A. 2019. *Pengaruh Tektonik Kompresional Baratlaut-Tenggara Terhadap Struktur Bidang Perlapisan, Kekar, Sesar dan Lipatan di Pegunungan Kulon Progo-Yogyakarta*. Jurnal Geosapta Vol. 5, pp. 81-91.